

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-5>

УДК 338.2

О. А. Романова <sup>а)</sup>, Д. В. Сиротин <sup>б)</sup><sup>а, б)</sup> Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация<sup>а)</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6459-881X><sup>б)</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3794-3956>, e-mail: [sirotin.dv@uiec.ru](mailto:sirotin.dv@uiec.ru)

## Методы определения эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований Урала<sup>1</sup>

Переоценка ценностей современного общества обусловила принципиальную трансформацию моделей экономического развития, стратегическим вектором которой является экологизация всех видов промышленной деятельности. Особо актуальна эта проблема для регионов индустриальной специализации, в частности, для Урала, где экологическая нагрузка на территорию во многом определяется функционированием горно-металлургического комплекса как основного источника техногенных образований. В связи с этим целью исследования является разработка методического подхода к оценке эколого-экономической эффективности технологических решений в области переработки техногенного сырья. Методология исследования базируется на теории эффективности промышленного производства, теории устойчивого развития и концептуальных принципах циркулярной экономики. При разработке методического инструментария оценки эффективности использованы методы сравнительного, структурно-логического, экономико-статистического анализа, реальных опционов. Проведен сопоставительный анализ и выявлены разнонаправленные тенденции образования, утилизации, накопления отходов горно-металлургического производства России и Среднего Урала за период с 2013 г. по 2019 г. Показана уникальность техногенных ресурсов Урала с точки зрения их многокомпонентного состава, включая стратегически важные черные, цветные и редкоземельные металлы. Это во многом обусловило гипотезу исследования о предпочтительном инструментарии оценки эффективности переработки техногенных образований на основе методологии реальных опционов. Систематизация имеющихся подходов к оценке эколого-экономической эффективности переработки техногенных ресурсов позволила обосновать нецелесообразность использования традиционных методов ее оценки только на базе стоимостных показателей. Предложен функциональный методический подход к оценке эффективности, основанный на методологии реальных опционов. Сформированы его основные этапы, разработан алгоритм оценки эколого-экономической эффективности переработки техногенного сырья. Выделены реальные опционы в сфере переработки техногенных ресурсов металлургического производства, моделирующие варианты управленческих решений в меняющихся условиях. Универсальность разработанного методического подхода, учитывающего как неопределенность внешней среды, так и требования наилучших доступных технологий, позволяет его рекомендовать при выборе эффективных инвестиционных проектов переработки техногенных ресурсов.

**Ключевые слова:** циркулярная экономика, эколого-экономическая эффективность, техногенные образования, горно-металлургическое производство, наилучшие доступные технологии, региональная практика, методы оценки, бинарное дерево, реальные опционы, модель Блэка — Шоулза

### Благодарность

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ №20-010-00719 А «Моделирование процессов кросс-индустриальной сетизации в промышленном комплексе на основе гибридных технологий».

**Для цитирования:** Романова О. А., Сиротин Д. В. Методы определения эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований Урала // Экономика региона. 2021. Т. 17, вып. 1. С. 59-71. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-5>

<sup>1</sup> © Романова О. А., Сиротин Д. В. Текст. 2021.

## RESEARCH ARTICLE

Olga A. Romanova <sup>a)</sup>, Dmitry V. Sirotin <sup>b)</sup><sup>a, b)</sup> Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation<sup>a)</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6459-881X><sup>b)</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3794-3956>, e-mail: [sirotin.dv@uiec.ru](mailto:sirotin.dv@uiec.ru)**Environmental and Economic Efficiency of Recycling Industrial Waste in the Urals**

*A change in values of modern society has led to the transformation of economic development models based on the greening of industrial activities. This problem is particularly relevant for industrial regions, including the Urals, where environmental pressure mostly depends on the mining and metallurgical industry, which is a source of industrial waste. In this regard, we develop a methodology for assessing environmental and economic efficiency of technological solutions for processing industrial raw materials. The research methodology is based on the theory of industrial production efficiency, sustainable development theory and circular economy principles. To assess the efficiency, we applied the methods of comparative, structural and logical, economic and statistical analysis, as well as real options method. The comparative analysis revealed various trends in the generation, recycling, and accumulation of waste from mining and smelting activities in the whole Russia and the Middle Urals in the period 2013–2019. The industrial waste of the Urals is unique in terms of its multicomponent composition, including ferrous, non-ferrous and rare-earth metals. Thus, the real options method is optimal for assessing the efficiency of recycling industrial waste. The analysis of the approaches to the assessment of environmental and economic efficiency confirmed that traditional methods based on cost indicators are unreliable compared to the real options method. We described the main stages of this method and developed an algorithm for assessing environmental and economic efficiency of processing industrial raw materials. Further, we identified the real options for processing industrial resources of steel production that influence managerial decisions in a changing environment. Due to the versatility of the developed method, which considers both external uncertainty and requirements of advanced technologies, we recommend using this method for selecting effective investment projects aimed at processing industrial raw materials.*

**Keywords:** circular economy, environmental and economic efficiency, industrial waste, mining and smelting industry, advanced technologies, regional practice, assessment methods, binary tree, real options, Black-Scholes model

**Acknowledgments**

*The article has been prepared with the support of Russian Foundation for Basic Research, the grant No. 20–010–00719 A “Modelling the processes of cross-industrial networkization in the industry based on hybrid technologies”.*

**For citation:** Romanova, O. A. & Sirotin, D. V. (2021). Environmental and Economic Efficiency of Recycling Industrial Waste in the Urals. *Ekonomika regiona [Economy of region]*, 17(1), 59–71, <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-5>

**Введение**

Современные быстро меняющиеся технологический и экономический ландшафты мировой экономики актуализируют процессы формирования новых парадигм развития, новых концептуальных взглядов, связанных с формированием «экологического общества». В таком обществе во главу угла ставится забота о природе, определяющими политическими принципами становятся «устойчивое развитие и вторичное использование отходов» [1, с. 64]. Таким образом, значимость использования отходов в экологическом обществе из чисто экономической проблемы не только перерастает в эколого-экономическую, но и становится одним из важнейших политических принципов функционирования экологического общества. Ключевые принципы формирования «экологического общества» во многом идентичны принципам, заложенным в основу так называемой циркулярной экономики (ЦЭ) [2–4]. Принципы ЦЭ находят все большее отражение в нормативно-правовых актах стран ЕС, Южной Кореи, Японии. Так, в 2015 г. в ЕС был

принят план действий (СЕАР), в котором предусматривались меры, стимулирующие переход стран ЕС к циркулярной экономике<sup>1</sup>. Важно подчеркнуть, что Европейский союз активизирует применение принципов ЦЭ не только экономическими, но и политическими мерами, что может явиться дополнительным аргументом в пользу некоторого сближения понятий «циркулярная экономика» и «экологическое общество». Помимо данных понятий аналогичный смысл имеют все чаще применяемые термины «циклическая экономика», «экономика замкнутого цикла», «зеленая экономика» и т. д. Но, независимо от используемого термина, стратегическим вектором развития общества будущего становится экологизация всех видов деятельности [5]. В связи с этим основной проблемой исследования вы-

<sup>1</sup> European Commission (December 2nd, 2015). ‘Closing the loop — an EU action plan for the Circular Economy’. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM (2015) 614 final, Brussels, 21 p.

ступает поиск путей совершенствования методического аппарата определения эколого-экономической эффективности реализации технологических решений в области переработки техногенного сырья.

### Формирование техногенных образований

Актуализация роли и значимости промышленного развития в экономике любой страны способствовала усилению исследований в области экологизации такого развития. С учетом мировых тенденций экологизации в России были разработаны ключевые нормативно-правовые акты по наилучшим доступным технологиям (НДТ), то есть по технологиям, которые являются экономически эффективными, оказывают наименьшее воздействие на окружающую среду, позволяют обеспечивать ресурсо- и энергосбережение. Такие технологии фактически подлежат постепенному внедрению на всех объектах, ухудшающих экологическую обстановку. Эти требования содержались в ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон „Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации»<sup>1</sup>. Общий объем необходимых для перехода на НДТ инвестиций, по оценке Минпромторга РФ, составляет 8,22 трлн руб. Около 43 % от этой суммы составляют инвестиции, требуемые для такого перехода в горно-металлургическом комплексе (ГМК), а также для создания системы обращения с отходами. Это во многом обусловило выделение в рамках национального проекта «Экология», объединяющего 11 федеральных проектов, специального федерального проекта «Внедрение наилучших доступных технологий». Именно на реализацию этого проекта предусмотрено выделение наибольших средств (60 %) — 2,4 трлн руб. из общего бюджета проекта в 4,0 трлн руб., рассчитанного на 6 лет.

Функционирование ГМК является одним из важнейших источников образования отходов и формирования техногенных образований [6, 7], создающих серьезные барьеры для перехода отечественной экономики от линейной к циркулярной. Объемы образованных отходов горно-металлургического производства постоянно возрастают. За период с 2013 г. по 2019 г. они увеличились с 4950 млн т до 7450 млн т, то есть выросли в 1,5 раза (рис. 1). Но в качестве положительной тенденции можно отме-

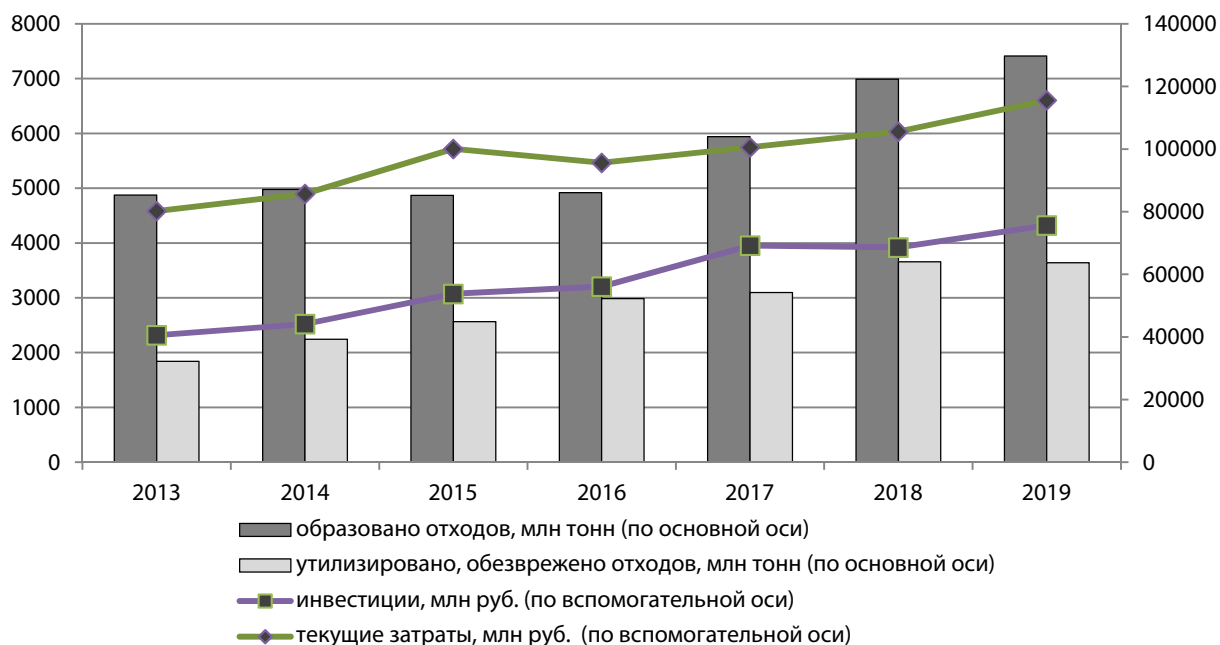
тить более высокие темпы утилизации и обезвреживания образованных отходов, которые выросли за этот период почти в 2 раза (1950 млн т в 2013 г. и 3850 млн т в 2019 г.). В результате, если в 2013 г. утилизировалось лишь 38 % отходов, образованных в горно-металлургическом комплексе, то по итогам 2019 г. эта цифра составляла уже 50 %.

Существенную роль в повышении степени переработки отходов играет инвестиционная политика горно-металлургических предприятий. За период с 2013 г. по 2019 г. инвестиции в основной капитал предприятий горно-металлургического комплекса, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, возросли в 1,87 раза (40,5 млн руб. — 2013 г., 75,6 млн руб. — 2019 г.). Возрастают также за этот период и текущие затраты на охрану окружающей среды в указанном комплексе, хотя темп их роста был несколько ниже — рост в 1,44 раза (2013 г. — 80,2 млн руб., 2019 г. — 115,6 млн руб.) (рис. 1).

Реализация в России принципов циркулярной экономики, связанных с экологизацией всех видов деятельности, имеет особое значение для регионов индустриальной специализации. К числу таких регионов относится Средний Урал, где доля отходов горно-металлургических производств в региональном объеме отходов производства и потребления составляет более 95 %. Поэтому закономерно, что освоение техногенных месторождений и переработка отходов горно-металлургического комплекса являются на Среднем Урале важнейшими направлениями в области реализации принципов циркулярной экономики. Образование отходов в данном региональном комплексе имеет тенденцию к снижению (табл. 1). Но это не столько результат повышения степени малоотходности технологических процессов, сколько итог снижения объемов производства.

За период с 2013 г. по 2019 г. наличие накопленных отходов на предприятиях горно-металлургического комплекса региона возросло с 8340 млн т до 8745 млн т. В то же время инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов предприятиями горно-металлургического комплекса Среднего Урала, возросли более чем в 6 раз. При этом отмечается появление в региональной металлургии тенденции к росту инвестиций, направленных на снижение экологической нагрузки на территории базирова-

<sup>1</sup> Федеральный Закон от 21.07.2014. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон „Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп. от 26 июля 2019 г.).



**Рис. 1.** Образование и утилизация отходов предприятий горно-металлургического комплекса РФ, а также инвестиции в основной капитал и текущие затраты, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов предприятий российского ГМК (источник: составлено авторами на основе статистических показателей «Образование отходов производства и потребления по видам экономической деятельности (по ОКВЭД и ОКВЭД2)» и «Утилизация и обезвреживание отходов производства и потребления по видам экономической деятельности (по ОКВЭД и ОКВЭД2)» Федеральной службы государственной статистики, а также данных бюллетеней «Сведения о текущих затратах на охрану окружающей среды» за 2013–2019 гг. <https://gks.ru/folder/11110/document/13295>)

**Fig. 1.** Generation and recycling of waste from mining and smelting enterprises in the Russian Federation, as well as investments in fixed assets and operating costs aimed at environmental protection and rational use of natural resources by these enterprises

Таблица 1

**Показатели образования и использования отходов организаций горно-металлургического комплекса Свердловской области**

Table 1

**Indicators of generation and management of waste of mining and smelting enterprises in Sverdlovsk Oblast**

Показатель	Значение показателя по годам	
	2013	2019
Образовано отходов, млн т	173,9	135,1
Утилизировано и обезврежено отходов, млн т	70,5	52,2
Инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, млрд руб.	1	5,95
Текущие затраты на охрану окружающей среды, млрд руб.	7,3	9,7
в том числе: текущие затраты на обращение с отходами, млрд руб.	0,74	1,5

Источник: составлено авторами с использованием государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области» в 2013 и 2019 гг. и данных Федеральной службы государственной статистики (см.: Текущие (эксплуатационные) затраты на охрану окружающей среды в Свердловской области: Стат. сб. / Управление Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области и Курганской области. Екатеринбург, 2020. 49 с.)

ния предприятий горно-металлургического комплекса.

В условиях замедляющихся темпов роста спроса на металл активизация инвестиционной деятельности в области освоения новых месторождений может стать проблематичной, что будет стимулировать значимость переработки техногенных ресурсов. Но целесообраз-

ность вовлечения техногенного сырья в производственный процесс требует не только всестороннего эколого-экономического обоснования эффективности такого решения, но и выявления технологических, маркетинговых возможностей извлечения и реализации получаемых из техногенного сырья продуктов. Все более значимым становится рассмотрение техноген-



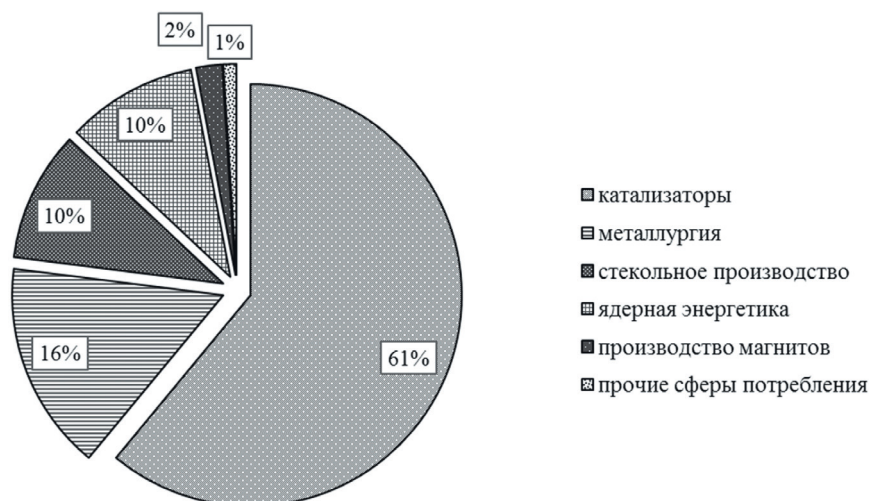


Рис. 2. Структура потребления редкоземельных металлов в России, % (источник: [8])

Fig. 2. Structure of the consumption of rare-earth metals in the Russian Federation, %

ного сырья как важного ресурсного источника получения черных и цветных металлов, редких и редкоземельных элементов.

#### Техногенные ресурсы как сырьевая база редких и редкоземельных элементов

Редкие и редкоземельные металлы (РЗМ) являются критически важными для развития многих высокотехнологичных отраслей экономики, включая солнечную энергетику, авиационную и космическую технику, оптоволоконную технику, производство специальных сталей и сплавов и др. РЗМ являются также незаменимыми элементами для развития многих других производств современной промышленности (рис. 2).

Россия, к сожалению, импортирует в настоящее время более 80 % редких и редкоземельных металлов, занимая при этом ведущие места в мире по запасам многих из редкоземельных элементов. В соответствии с проектом «Стратегии развития отрасли редких и редкоземельных металлов РФ на период до 2035 года»<sup>1</sup>, доля импорта РЗМ должна сократиться к 2025 г. до 60 %, а к 2035 г. до 40 %. Прогнозируемый рост отечественного производства РЗМ, соответственно, предопределяет необходимость развития местной сырьевой базы редкоземельных металлов. Но серьезные коррективы в этот процесс могут быть внесены появлением новой определяющей во всем мире тенденции развития отрасли РЗМ, связанной с возрастающей ролью техногенного

РЗМ-содержащего сырья. Зачастую в таком сырье содержание редкоземельных компонентов значительно превосходит таковое в рудных месторождениях, а резервы этих компонентов в накопленных отходах равноценны открытию новых месторождений.

Россия обладает крупнотоннажными ресурсами РЗМ-содержащего техногенного сырья. Например, только на Среднем Урале накоплено более 300 млн т техногенных ресурсов, оценочное содержание в которых оксидов редкоземельных элементов достигает 480 тыс. т. Прежде всего, это красные шламы глиноземного производства Среднего Урала, пироксенитовые хвосты АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» и др. Перспективными техногенными ресурсами, помимо шлаков и шламов черной и цветной металлургии, являются шлаки, шламы и пыли ферросплавного производства [9, 10]. Наиболее значимыми среди них являются шлаки, которых ежегодно в России образуется более 1300 тыс. т. Однако уровень переработки ферросплавных шлаков, несмотря на достаточно высокое содержание здесь ценных элементов, остается низким — порядка 30 %. На сегодняшний день накоплен достаточно объемный опыт переработки ферросплавных шлаков [11, 12].

#### Методы определения эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований

Важность обоснованного выбора эффективных технологических решений в области переработки техногенных ресурсов определяется рядом факторов. Прежде всего, в России, в том числе на Урале, имеются масштабные техногенные образования, комплексный со-

<sup>1</sup> Проект «Стратегии развития отрасли редких и редкоземельных металлов РФ на период до 2035 года». URL: [http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya\\_razvitiya\\_otrasli\\_redkih\\_i\\_redkozemelnyh\\_metallov\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_period\\_do\\_2035\\_goda](http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_otrasli_redkih_i_redkozemelnyh_metallov_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2035_goda) (дата обращения: 30.07.2020).

став которых делает их перспективным сырьем для развития высокотехнологичных производств; здесь отечественными научно-исследовательскими и проектными институтами разработаны альтернативные технологические процессы извлечения из техногенного сырья стратегически важных компонентов; все более возрастает значимость снижения негативного влияния горно-металлургического производства на окружающую среду. Имплементация принципов экологически безопасного развития в выработку важнейших направлений переработки техногенных образований может обеспечить более экономное использование невозобновляемых природных ресурсов, сделать устойчивой нормой развитие малоотходного производства, принципиально улучшить экологическую ситуацию.

*Традиционные методы оценки эффективности.* Сегодня применяются различные традиционные методы оценки стоимости проектных решений, в том числе в области переработки техногенных образований. Среди них можно выделить метод капитализации доходов, метод Ольсона, метод компании-аналога, метод чистых активов и др. Но для оценки экономической эффективности реализации инвестиционного проекта по использованию техногенных образований можно выделить, по нашему мнению, два основных подхода: сравнительная оценка, учитывающая сопоставление техногенного продукта с традиционным, и оценка дисконтированных денежных потоков (ЧДД), учитывающая ценность денежных потоков, ожидаемых в будущем.

Расчет приведенной ценности ожидаемых денежных потоков основан на их дисконтировании. Ставка дисконтирования отражает риск денежных потоков, ожидаемых в будущем. При этом расчет денежных потоков зависит от выбранной стратегии, учитывающей утилизацию или использование отходов металлургических производства в той или иной сфере. Для определения показателей эколого-экономической эффективности утилизации и использования металлургических отходов применимы следующие формулы:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{\text{ДП}_t}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

где ЧДД — чистый приведенный доход актива;  $n$  — срок жизни актива; ДП — денежные потоки за период  $t$ ;  $r$  — ставка дисконтирования [13].

$$\mathcal{E}_{\text{ут}} = \left( \frac{n_1}{a} \right) (C_1 + n_2 C_2 - C_3), \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ут}}$  — экономический эффект утилизации отходов металлургического производства;  $C_1$ ,  $C_3$  — себестоимость материалов из традиционного и утилизируемого сырья соответственно;  $C_2$  — ежегодные затраты на содержание отвалов;  $n_1$  — коэффициент, учитывающий долю затрат на данный вид материала в общих затратах на сырье и материалы;  $n_2$  — коэффициент, учитывающий частичную или полную ликвидацию отвалов ( $0,3 < n < 1$ );  $a$  — удельный расход утилизируемого сырья на единицу продукции [14].

$$\mathcal{E}_{\text{исп}} = \frac{(\Pi - C)D}{K_k}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{исп}}$  — экономическая эффективность использования отходов металлургического производства, руб.;  $\Pi$  — цена реализации единицы продукции на основе отходов, руб.;  $C$  — себестоимость единицы продукции на основе отходов, руб.;  $D$  — прогнозируемый годовой объем образования отходов металлургического производства, ед.;  $K_k$  — коэффициент капитализации, доли ед. [15].

$$\Delta P_0 = \sum_{i=1}^n \left[ \Pi_{0i} - (C_{0i} + D_i) \right] A_{0i}, \quad (4)$$

где  $\Delta P_0$  — прирост чистой прибыли предприятия в результате комплексного использования отходов металлургического производства, руб.;  $\Pi_{0i}$  — цена реализации конечного продукта, при производстве которого использован заменяемый ресурс  $i$ , руб.;  $C_{0i}$  — себестоимость производства единицы аналогичной продукции, полученной с применением отходов, руб.;  $D_i$  — суммарные отчисления в бюджет с учетом льгот за использование техногенного сырья, руб.;  $A_{0i}$  — объем реализованной товарной продукции в натуральном выражении, полученной с применением отходов [16].

$$\Delta Y = \Delta Y_{\text{в}} + \Delta Y_{\text{б}}, \quad (5)$$

где  $\Delta Y$  — эффект от снижения ущерба окружающей среде;  $\Delta Y_{\text{в}}$  — сокращение ущерба от разработки отвалов;  $\Delta Y_{\text{б}}$  — снижение ущерба водному и другим видам хозяйства [16].

$$\text{ЧД}_{\text{эл}}^t = P_{\text{эл}}^t - Z_{\text{эл}}^t, \quad (6)$$

где  $\text{ЧД}_{\text{эл}}^t$  — чистый экологический доход, полученный в  $t$ -м году;  $P_{\text{эл}}^t$  — сумма экологических результатов, полученных в  $t$ -м году;  $Z_{\text{эл}}^t$  — сумма экологических затрат, осуществленных в  $t$ -м году [17].

При оценке чистого экологического дохода (6) сумма экологических результатов учитывает стоимостное выражение предотвращен-

ного экологического ущерба, достигнутого в результате переработки отходов. Это способствует высвобождению занимаемых ими земельных площадей и сокращению воздействия на землю вредных веществ, содержащихся в отходах. Сумма экологических затрат включает стоимостное выражение нанесенного дополнительными выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух и в поверхностные водные объекты экологического ущерба.

Основным методическим принципом определения эколого-экономической целесообразности вовлечения в производство отходов металлургического производства является учет экологических результатов (притоков) и затрат (оттоков) реализации проекта, выраженных в денежной форме. Расчет экологической составляющей чистого приведенного дохода (приведенной ценности ожидаемых денежных потоков) в  $t$ -м году осуществляется по формуле:

$$\text{ЧПД}_{\text{эл}}^t = \frac{\text{ЧД}_{\text{эл}}^t}{(1+r)^t}. \quad (7)$$

При этом ставка дисконтирования  $r$  отражает ожидаемую доходность проекта. Показатель  $r$  может быть определен на базе универсальной модели оценки капитальных активов (САРМ), адаптированной к реальным условиям проекта. Так, модель САРМ имеет вид:

$$r = r_0 + \beta (R_p - r_0), \quad (8)$$

где  $r_0$  — безрисковая ставка доходности;  $R_p$  — рыночная доходность переработки отходов в конечный продукт;  $\beta$  — показатель волатильности цены конечной продукции на рынке (отражает рискованность вложения по отношению к рынку).

Тогда формула интегрального эколого-экономического чистого дисконтированного дохода за срок реализации проекта ( $\text{ЧПД}_{\text{э\&}}$ ) примет вид:

$$\text{ЧПД}_{\text{э\&}} = \sum_{t=1}^n \text{ЧПД}_{\text{эн}}^t + \sum_{t=1}^n \text{ЧПД}_{\text{эл}}^t, \quad (9)$$

где  $\text{ЧПД}_{\text{эн}}^t$  — экономическая составляющая чистого приведенного дохода в  $t$ -м году.

Многokrатно возросшая скорость технологических преобразований, цифровая трансформация промышленности не только серьезно изменяют сущность производственных процессов, но и определяют необходимость более корректной оценки ожидаемой эффективности реализации этих процессов. Конечно, при этом останутся востребован-

ными и традиционные подходы, связанные с оценкой эффективности на базе стоимостных показателей (доходный, затратный, сравнительный методы). Однако их надежность при оценке эффективности использования многокомпонентных техногенных отходов металлургического производства недостаточна. В данном случае, по нашему мнению, предпочтительным является функциональный подход, при котором главным в оценке становится учет быстро меняющихся требований мировой и национальной конъюнктуры и делается акцент на функциональные возможности конкретного объекта оценки. При таком подходе процесс переработки техногенных образований становится управляемым, появляется возможность принятия новых решений, учитывающих более актуальную информацию, меняющуюся ситуацию и т. д. Также при этом может быть обеспечена оптимальность принимаемых решений в области переработки техногенных образований, учитывающих меняющиеся условия хозяйствования. А наиболее адекватной методической основой оценки эффективности переработки техногенных образований становятся, по нашему мнению, такие методы, как реальные опционы [18–20].

#### **Использованные модели и предлагаемый метод оценки эффективности переработки техногенных образований на основе методологии реальных опционов**

Реальный опцион представляет собой право, но не обязательство его владельца на совершение каких-либо операций с активами в будущем. Расчет стоимости реального опциона целесообразно, по нашему мнению, проводить на основе модели Блэка — Шоулза. Традиционно данная модель используется для оценки финансовых опционов *CALL* американского и европейского видов. Применение американского опциона возможно в любой момент, но не позже даты его исполнения. На практике также используют формулы для европейского опциона, который отличается тем, что может быть исполнен только в указанную дату.

По нашему мнению, для оценки эффективности переработки техногенных образований, при расчете реального опциона *CALL* [23] за основу целесообразно принять модель Блэка — Шоулза, модифицированную Р. Мертоном с учетом выплаты дивидендов, которые снижают стоимость актива. Для этого система элементов модели дополнена показателем, отражающим стоимость ( $y$ ), теряемую в течение

срока жизни опциона. С учетом особенностей переработки техногенных отходов металлургических производств в модифицированном виде модель Блэка — Шоулза имеет следующий вид:

$$C(t) = S \cdot e^{-yt} \Phi(z_1) - X \cdot e^{-rt} \Phi(z_2), \quad (10)$$

где

$$z_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r - y + \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}} + \frac{\sigma\sqrt{t}}{2};$$

$$z_2 = z_1 - \sigma\sqrt{t};$$

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx;$$

$C(t)$  — цена учета стратегической гибкости использования отходов металлургического производства;  $S$  — текущая стоимость денежных потоков инвестиционного проекта по переработке металлургических отходов;  $r$  — ставка безрисковой доходности;  $X$  — оценка издержек, связанных с переработкой отходов металлургических производств;  $X \cdot e^{-rt}$  — приведенная стоимость цены затрат, связанных с переработкой металлургических отходов;  $\sigma$  — неопределенность денежных потоков проекта, обусловленная изменчивостью рыночного спроса на конечный продукт из техногенного сырья;  $\Phi(z)$  — кумулятивная функция нормального распределения;  $y$  — стоимость, теряемая в течение срока жизни опциона.

### Полученные результаты

Принятие за основу оценки стоимости опционов модели Блэка — Шоулза позволяет выделить факторы, оказывающие значительное влияние на эффективность планируемого к реализации проекта. Так, при проектировании различных возможностей переработки техногенных образований металлургических производств алгоритм оценки с использованием метода реальных опционов может быть представлен в виде бинарного дерева событий. Ключевым фактором, лежащим в основе задачи построения дерева событий, является создание условий для развития рынка востребованных продуктов, получаемых на базе переработки отходов металлургического производства. Общий вид бинарного дерева событий для проектов по переработке техногенных образований был предложен авторами ранее [24]. Для предприятий металлургического комплекса моментом начала реализации проекта должно выступать создание условий для переработки металлургических шла-

ков в конечный продукт, что составляет основу (отправную точку) бинарного дерева событий. В общем виде бинарное расхождение ветвей дерева событий выражается в сохранении базового варианта, учитывающего переработку шлака в полном проектом объеме, и в возможности активации опциона продуктовой гибкости, предусматривающего частичную утилизацию шлака. При этом переработка шлака в полном объеме (базовый вариант) учитывается как при сохранении стабильности качества сырья, так и при его снижении, что преимущественно скажется на цене готового продукта. В свою очередь, опцион продуктовой гибкости ориентирован на сокращение издержек, связанных с изменением спроса на техногенные отходы. В зависимости от заданных проектом порогов и ограничений при снижении спроса на техногенные отходы могут быть реализованы опцион выжидания благоприятного времени или опцион отклонения проекта.

Каждому ответвлению от базового сценария соответствует свой реальный опцион, оцененный по модели Блэка — Шоулза, адаптированной к условиям реального сектора экономики. Таким образом, моделью оценивается стратегическая ценность проекта. Принятие условий учета стратегической гибкости на основе реальных опционов увеличивает стоимость проекта в сравнении с базовым вариантом его реализации. Но в условиях высокой неопределенности мировой конъюнктуры такой подход позволяет учесть основные риски реализации проекта и своевременно скорректировать необходимые управленческие решения.

Использование реальных опционов в проектах по переработке техногенных образований предполагает изменение проектных параметров в связи со встраиванием элементов гибкости, предназначенных для повышения общей эффективности проекта. Для выявления этих элементов и определения их содержания систематизированы основные виды реальных опционов на примере переработки отходов ферросплавных производств (табл. 2).

Проведенные нами исследования по определению эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований металлургических производств, а также систематизация ранее проведенных исследований в этой области [21, 22, 25] позволили сформировать достаточно универсальный, 3-этапный методический подход к оценке ожидаемой эффективности технологических решений (рис. 3).



Таблица 2

## Реальные опционы в сфере переработки техногенных отходов ферросплавных производств

Table 2

## Real options in the field of recycling waste from ferroalloy production

Название реального опциона	Содержание
Опцион выжидания благоприятного времени	Опцион позволяет выбрать оптимальный момент для начала работы проекта и момент приостановки проекта при наступлении неблагоприятных экологических или внешних условий и его повторного запуска в более удобный период. В рамках проекта по переработке техногенных образований ферросплавных производств применение опциона может быть обосновано, например, снижением спроса на техногенное сырье или изменением экологических требований
Опцион роста	Исполнение опциона оптимально в ситуации, при которой начальные инвестиции будут служить необходимым условием будущего экологически необременительного развития. Например, приобретение отсадочных камер, классификаторов или других агрегатов для переработки шлаков ферросплавных производств, которые могут быть использованы на следующих этапах реализации проекта
Опцион изменения масштаба	Позволяет производителю ферросплавов оптимизировать освоение отвалов, изменяя объемы перерабатываемых шлаков как в большую, так и в меньшую сторону в силу изменения внешних условий и экологических требований
Опцион последовательных инвестиций	Реализация опциона предоставляет право производства продукции на основе техногенных отходов ферросплавного производства в рамках последовательных этапов проекта. Переход на каждый очередной этап создает условия для этапа последующего. Опцион актуален в случае возможности экологизации дополнительных процессов подготовки техногенного сырья
Опцион ресурсной гибкости проекта	Дает держателю опциона право варьировать между видами шлаков и экологичностью их переработки, приемлемыми для производства конечного продукта
Опцион продуктовой гибкости	Заключается в том, чтобы при наступлении неблагоприятных экологических или рыночных условий частично или полностью перенаправить предназначенные для получения основного продукта шлаки на утилизацию
Опцион отклонения проекта	Опцион становится актуальным при наступлении неблагоприятных экологических условий или условий внешней среды для переработки шлаков и применим для сокращения связанных с этим убытков. В зависимости от хода реализации проекта возмещение затрат может быть частичным или полным, сопровождающим завершение проекта

Источник: составлено авторами на основе материалов публикации [24].

Основу предлагаемого подхода составляет имеющаяся региональная практика проведения оценки на основе традиционных технико-экономических показателей, а также успешная апробация предложенного авторами определения эффективности этого процесса на основе метода реальных опционов. Предлагаемый авторский функциональный подход на этапе оценки стратегической гибкости учитывает возможность выбора оптимального для каждого отдельного проекта метода оценки стоимости опционов с учетом возможных модификаций (с учетом и без учета выплаты дивидендов, опционы покупки / продажи и др.). База самих реальных опционов также индивидуальна, а схема механизма их подключения, имеющая вид бинарного дерева событий, надежна и визуально удобна.

Можно ожидать улучшения экологической ситуации на территориях базирования предприятий ГМК в процессе реализации нацио-

нального проекта «Экология». В рамках данного проекта предусматривается разработка отраслевых методик оценки затрат перехода организаций на принципы НДТ и введения системы стимулов для активизации такого перехода. В качестве первого этапа этой работы можно отметить введение в первой половине 2020 г. Национального стандарта РФ НДТ<sup>1</sup>. Этот стандарт содержит методические рекомендации по оценке затрат предприятий электроэнергетики по снижению выбросов загрязняющих веществ для достижения ими технологических показателей наилучших доступных технологий. В основных методических рекомендациях содержатся алгоритм расчета затрат на снижение выбросов загрязняющих

<sup>1</sup> Национальный стандарт Российской Федерации Наилучшие доступные технологии. Утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.09.2019 г. № 557-ст. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200167475> (дата обращения: 10.08.2020).



**Рис. 3.** Основные этапы предлагаемого методического подхода к оценке эколого-экономической эффективности переработки техногенных образований металлургических производств (источник: составлено авторами)

**Fig. 3.** The main stages of the method for assessing environmental and economic efficiency of recycling industrial waste from steel industry

веществ в отрасли, а также алгоритм выбора НДТ и перспективных технологий для этих целей. До конца 2022 г. должны быть разработаны методические рекомендации для остальных отраслей, в том числе добычи полезных ископаемых и металлургического производства. В целях стимулирования перехода к НДТ для хозяйствующих субъектов, в соответствии с национальным проектом «Экология», предусмотрены не только налоговые льготы и ускоренная амортизация основных средств, но и использование в качестве расчета за вред, нанесенный окружающей среде, средств, израсходованных на внедрение НДТ.

### Закключение

Определяющим трендом промышленного развития, в основе которого лежит переоценка ценностей современного общества, является его экологизация. Имплементация принципов экологически безопасного развития в разработку отечественных стратегий промышленного развития позволяет сделать устойчивыми нормами развитие малоотходного производства, длительное использование произведенной продукции, принципиально улучшить экологическую ситуацию, что является важным

этапом трансформации линейной экономики в экономику замкнутого цикла (циркулярную экономику). Все возрастающая актуальность проблемы экологизации всех видов промышленной деятельности и неизбежность внедрения в хозяйственную практику страны принципов циркулярной экономики предопределяют необходимость совершенствования методического аппарата определения эколого-экономической эффективности реализации любых технологических решений в области переработки техногенного сырья. Предлагаемый функциональный методический подход к определению эколого-экономической эффективности этих решений на базе методологии реальных опционов, апробированный в условиях горно-металлургического комплекса Урала, является универсальным для обоснования и выбора предпочтительных направлений переработки любых техногенных ресурсов. Выбор и реализация оптимальных вариантов переработки техногенных ресурсов на основе методологии реальных опционов могут позволить снизить дефицит стратегически важных черных, цветных и редкоземельных металлов, расширить сырьевую базу металлургического и целого ряда высокотехнологичных производств.

Кроме того, реализация выбранных по предлагаемой методологии проектов переработки техногенных ресурсов обеспечит получение дохода за счет предотвращенного экологического ущерба, существенным образом сократит их негативное воздействие на окружающую среду. Усиление внимания к эколого-эко-

номической эффективности переработки техногенных образований, помимо решения ряда вышеперечисленных проблем, будет способствовать снижению экологического следа промышленной деятельности в целом, то есть являться одним из реальных шагов на пути к формируемой циркулярной экономике.

### Список источников

1. Йенсен Р. Общество мечты. Как грядущий сдвиг от информации к воображению преобразит ваш бизнес. СПб.: Стокгольмская школа экономики в Санкт-Петербурге, 2002. 272 с.
2. Kalmykova Y., Rosado L., Sadagopan M. Circular economy — from review of theories and practices to development of implementation tools // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 135. P. 190–201. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034.
3. Longevity and circularity as indicators of eco-efficient resource use in the circular economy / Figge F., Thorpe A. S., Givry P., Canning L., Franklin-Johnson E. // *Ecological Economics*. 2018. Vol. 150. P. 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030>.
4. Information support of the circular economy: the objects of accounting at recycling technological cycle stages of industrial waste / Vegera S., Malei A., Sapeha I., Sushko V. // *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2018. Vol. 6, № 1. P. 190–210. DOI: 10.9770/jesi.2018.6.1(13).
5. Романова О. А. Экологический императив переработки техногенных отходов в условиях формирования экономики замкнутого цикла // *Техноген-2019*. Тр. конгр. с междунар. участием. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 62–65.
6. Kadyrov A. S., Kunaev V. A., Georgiadi I. V. Prospects for processing of ferrous metallurgical waste based on ArcelorMittal Temirtau experience // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62, № 1–2. С. 22–28. DOI: 10.1007/s11015-018-0620-3.
7. Mammadov H., Suleymanova I., Bahadur T. High-effective artificial porous gravel from metallurgical industry waste // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018. Vol. 10, № 9, spec. iss. С. 451–457.
8. Нечаев А. В., Поляков Е. Г. Существующий и перспективный баланс производства и потребления редкоземельных металлов в России // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2020. № 2. С. 49–53.
9. Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration / Rama Murthy Y., Kapure G. U., Tripathy S. K., Sahu G. P. // *Waste Management*. 2018. Vol. 80. С. 457–465. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.06.023.
10. Ziatdinov M. K., Shatokhin I. M., Leont'ev L. I. SHS technology for composite ferroalloys. 1. Metallurgical SHS: nitrides of ferrovanadium and ferrochromium // *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48, № 5. С. 269–276. <https://doi.org/10.3103/S0967091218050133>.
11. Reclamation of industrial tailings by means of metallurgical slag / Belanov I. P., Naumova N. B., Semina I. S., Savenkov O. A., // *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48, № 12. С. 789–792. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120033>.
12. Отходы ферросплавной промышленности России / Жучков В. И., Леонтьев Л. И., Сычев А. В., Дашевский В. Я., Заякин О. В. // *Техноген-2019*. Тр. конгр. с междунар. участием. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 99–102.
13. Дамодаран А. Инвестиционная оценка. Инструменты и техника оценки любых активов: пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 1342 с.
14. Макарова В. Н. Экономическая эффективность утилизации шлаков ферросплавного производства // *НИОКР-2018*. Тр. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Альфа Принт, 2018. С. 340–341.
15. Методический инструментарий оценки инвестиционной привлекательности возобновляемых ресурсов северных и арктических территорий / Татаркин А. И., Балащенко В. В., Логинов В. Г., Игнатьева М. Н. // *Экономика региона*. 2016. Т. 12, № 3. С. 627–637.
16. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 367 с.
17. Выварец К. А., Выварец А. Д. Концептуальный подход к преодолению «тирании» дисконтирования // *Вестник ЮУрГУ*. 2008. № 20(120). С. 33–39. (Экономика и менеджмент).
18. Закревская Е. А., Деткова М. Е. Перспективы применения метода реальных опционов для определения оптимального момента инвестирования // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 6. С. 122–126.
19. Зубарев Г. В., Оздоева А. Х. Использование реальных опционов как метод снижения рисков для принятия проектных решений в нефтегазовой промышленности // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2018. № 6. С. 10–14.
20. Шелепина И. Г. Метод реальных опционов при управлении инвестициями в логистике // *РИСК. Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция*. 2018. № 3. С. 191–194.
21. Воспроизводство сырьевой базы цинка на основе рециклинга техногенного сырья / Брянцева О. С., Дюбанов В. Г., Паньшин А. М., Козлов П. А. // *Экономика региона*. 2013. № 2 (34). С. 63–70.

22. Сиротин Д. В. Оценка экономической эффективности новых технологических решений в металлургии региона // Сб. науч. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2016. С. 187–189.
23. Позднякова Е. А. Оценка экономической эффективности проектов освоения минерально-сырьевой базы с использованием метода реальных опционов // Экономика в промышленности. 2018. № 3. С. 280–286.
24. Romanova O. A., Sirotnin D. V. The methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations // *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University]. 2019. Iss. 3(55). P. 141–149. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-141-149>.
25. Романова О. А., Брянцева О. С., Позднякова Е. А. Ресурсный потенциал реиндустриализации старопромышленного региона. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2013. 251 с.

## References

1. Jensen R. (2002). *Dream Society: How the Coming Shift from Information to Imagination Will Transform Your Business* [Obshchestvo mehty. Kak gryadushchiy sdvig ot informatsii k voobrazheniyu preobrazit vash biznes]. Trans. from English. Stockholm School of Economics in St. Petersburg, 272. (In Russ.)
2. Kalmykova, Y., Rosado, L. & Sadagopan, M. (2018). Circular economy — from review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 190–201. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034.
3. Figge, F., Thorpe, A. S., Givry, P., Canning, L. & Franklin-Johnson, E. (2018). Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy. *Ecological Economics*, 150, 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030>.
4. Vegera, S., Malei, A., Sapeha, I. & Sushko, V. (2018). Information support of the circular economy: the objects of accounting at recycling technological cycle stages of industrial waste. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 6(1), 190–210. DOI: 10.9770/jesi.2018.6.1(13).
5. Romanova, O. A. (2019). Ekologicheskiiy imperativ pererabotki tekhnogennykh otkhodov v usloviyakh formirovaniya ekonomiki zamknutogo tsikla [The environmental imperative of processing industrial waste in the context of the formation of a closed-loop economy]. In: *Trudy kongressa «Tekhnogen-2019» s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the “Technogen-2019” Congress with international participation] (pp. 62–65). Ekaterinburg: UB RAS (In Russ.)
6. Kadyrov, A. S., Kunaev, V. A. & Georgiadi, I. V. (2018). Prospects for processing of ferrous metallurgical waste based on ArcelorMittal Temirtau experience. *Metallurgist*, 62 (1–2), 22–28. DOI: 10.1007/s11015-018-0620-3.
7. Mammadov, H., Suleymanova, I. & Bahadur, T. (2018). High-effective artificial porous gravel from metallurgical industry waste. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 10(9, Special Issue), 451–457.
8. Nechaev, A. V. & Polyakov, E. G. (2020). Current and prospective balance of production and consumption of ree in Russia. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral resources of Russia. Economics and Management], 2, 49–53. (In Russ.)
9. Rama Murthy, Y., Kapure, G. U., Tripathy, S. K. & Sahu, G. P. (2018). Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration. *Waste Management*, 80, 457–465. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.06.023.
10. Ziatdinov, M. K., Shatokhin, I. M. & Leont'ev, L. I. (2018). SHS technology for composite ferroalloys. 1. Metallurgical SHS: nitrides of ferrovandium and ferrochromium. *Steel in Translation*, 48(5), 269–276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218050133>.
11. Belanov, I. P., Naumova, N. B., Semina, I. S. & Savenkov, O. A. (2018). Reclamation of industrial tailings by means of metallurgical slag. *Steel in Translation*, 48 (12), 789–792. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218120033>.
12. Zhuchkov, V. I., Leontev, L. I., Sychev, A. V., Dashevskiy, V. Ya. & Zayakin, O. V. (2019). Waste from the Russian Ferroalloy industry. In: *Trudy kongressa «Tekhnogen-2019» s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the “Technogen-2019” Congress with international participation] (pp. 99–102). Ekaterinburg: UB RAS (In Russ.)
13. Damodaran, A. (2004). *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset* [Investitsionnaya otsenka. Instrumenty i tekhnika otsenki lyubykh aktivov]. Trans. from English. Moscow: Alpina Business books, 1342. (In Russ.)
14. Makarova, V.N. (2018). The economic efficiency of slag recycling in ferroalloy industry. In: *NIOKR-2018: trudy nauch.-prakt. konf. [R&D-2018: proceedings of the scientific and practical conference]* (pp. 340–341). Ekaterinburg: Alpha Print. (In Russ.)
15. Tatarkin, A. I., Balashenko, V. V., Loginov, V. G. & Ignatyeva, M. N. (2016). Methodological Tools for Assessing the Investment Attractiveness of Renewable Resources in Northern and Arctic Territories. *Ekonomika regiona* [Economy of region], 12(3), 627–637. (In Russ.)
16. Dvorkin, L. I. & Dvorkin, O. L. (2007). *Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Construction materials from industrial waste]. Rostov-on-don: Phoenix, 367. (In Russ.)
17. Vyvarec K.A., Vyvarec A.D. (2008). Conceptual approach for coping with discounting “oppression”. *Vestnik YUUrGU. Seriya «Ekonomika i menedzhment»* [Bulletin of South Ural State University, Series “Economics and Management”], 20(120), 33–39. (In Russ.)



18. Zakrevskaya, E. A. & Detkova, M. E. (2018). Prospects of real options applications to optimal investment moment determination]. *Fundamentalnye issledovaniya [Fundamental research]*, 6, 122–126. (In Russ.)
19. Zubarev, G. V. & Ozdoeva, A. H. (2018). Use of real options as a risks reduction method when making project decisions in the oil and gas industry. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom [Problems of economics and management of oil and gas complex]*, 6, 10–14. (In Russ.)
20. Shelepina, I. G. (2018). Real options method for investment management in logistics. *RISK. Resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsia [RISK: Resources, Information, Supply, Competition]*, 3, 191–194. (In Russ.)
21. Bryantseva, O. S., Dyubanov, V. G., Panshin, A. M. & Kozlov, P. A. (2013). Replacement of reserves zinc based on the recycling of technogenic raw materials. *Ekonomika regiona [Economy of region]*, 2(34), 63–70. (In Russ.)
22. Sirotin, D. V. (2016). Assessment of the economic efficiency of new technological solutions in the region's metal-lurgy. In: *Sb. nauch. statey XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh [Collection of scientific articles XIV international. scientific-practical Conference of young scientists]* (pp. 187–189). Ekaterinburg: Institute of Economics UB RAS. (In Russ.)
23. Pozdnyakova, E. A. (2018). Estimation of economic efficiency of mineral resource base development projects using the real options method. *Ekonomika v promyshlennosti [Russian journal of industrial economics]*, 3, 280–286. (In Russ.)
24. Romanova, O. A. & Sirotin, D. V. (2019). The methodological approach to determining the environmental and economic efficiency of processing of man-made mineral formations. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [News of the Ural State Mining University]*, 3, 141–149. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-141-149>.
25. Romanova, O. A., Bryantseva, O. S. & Pozdnyakova, E. A. (2013). *Resursnyy potentsial reindustrializatsii staropromyshlennogo regiona [Resource potential of reindustrialization of the old industrial region]*. Ekaterinburg: Institute of Economics UB RAS, 251. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Ольга Александровна Романова** — доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0002-6459-881X> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: [romanova.aa@uiec.ru](mailto:romanova.aa@uiec.ru)).

**Сиротин Дмитрий Владимирович** — кандидат экономических наук, научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН; Scopus Author ID: 57194002454; <http://orcid.org/0000-0002-3794-3956> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: [sirotin.dv@uiec.ru](mailto:sirotin.dv@uiec.ru)).

### About the authors

**Olga A. Romanova** — Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chief Research Associate, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; <http://orcid.org/0000-0002-6459-881X> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: [econ@uran.ru](mailto:econ@uran.ru)).

**Dmitry V. Sirotin** — Cand. Sci. (Econ.), Research Associate, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; Scopus Author ID: 57194002454; <http://orcid.org/0000-0002-3794-3956> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: [sirotind.umk@mail.ru](mailto:sirotind.umk@mail.ru)).

Дата поступления рукописи: 28.08.2020.

Прошла рецензирование: 06.10.2020.

Принято решение о публикации: 18.12.2020.

Received: 28 Aug 2020

Reviewed: 09 Oct 2020

Accepted: 18 Dec 2020